

АЛЕКСАНДРОВ ЮРИЙ БОРИСОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА
ИНДИВИДУАЛЬНОГО СОСТАВА ГАЗООБРАЗНОГО
ТОПЛИВА И ПРОДУКТОВ ЕГО ГОРЕНИЯ НА ОСНОВЕ
КОМПЬЮТЕРНО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

02.00.02 - аналитическая химия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Казань - 2007

Работа выполнена в Казанском государственном энергетическом университете

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор
Новиков Вячеслав Федорович

Официальные оппоненты: доктор химических наук, профессор
Евгеньев Михаил Иванович

кандидат химических наук, доцент
Савельева Наталия Ивановна

Ведущая организация: Казанский государственный технический
университет имени А.Н.Туполева

Защита состоится "22" марта 2007 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного Совета К 212.081.04 по химическим наукам Казанского государственного университета, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, химический факультет, Бутлеровская аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Отзыв на автореферат просим присылать по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ, научная часть.

Автореферат разослан "17" февраля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
кандидат химических наук

Л.Г. Шайдарова

Актуальность работы. Совершенствование методов анализа газообразного топлива и продуктов его горения, а также создание программного обеспечения, направленного на оптимизацию процессов горения в энергетических установках, является актуальной задачей аналитической химии. Получение информации о концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе промышленных предприятий позволяет решать проблемы, связанные с разработкой новых технологических решений направленных на оздоровление окружающей среды.

Из большого количества загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух при сжигании газообразного топлива, можно выделить несколько основных ингредиентов: оксиды азота; оксиды углерода; оксиды серы; твердые частицы (сажа); углеводороды. Также в атмосферном воздухе присутствует большое количество других веществ самой разнообразной физико-химической природы: аммиак, сероводород, альдегиды, полициклические ароматические углеводороды, хлорорганические соединения и др. Химические вещества, поступающие в атмосферный воздух от работы технологических установок промышленных предприятий, трансформируются с образованием более токсичных соединений. Эти вещества в результате трансграничного переноса могут загрязнять соседние регионы и оказывать негативное влияние на организм человека.

Для аналитического контроля продуктов горения газообразного топлива используются различные физико-химические методы анализа. В последнее время с этой целью стали широко использовать газовую хроматографию, которая позволяет в процессе однократного ввода пробы получать качественную и количественную информацию об индивидуальном и групповом составе продуктов горения. Однако при анализе примесных соединений в продуктах горения наблюдается недостаточно высокая чувствительность и селективность некоторых газохроматографических детекторов.

Одним из путей решения этой задачи является концентрирование примесных соединений на различных по селективности сорбентах, что позволяет уменьшить предел обнаружения (ПрО) анализируемых компонентов и обеспечить определение токсичных ингредиентов на уровне ПДК и ниже. Поэтому разработка такой методики анализа газообразного топлива и продуктов его горения, является перспективным направлением аналитической химии.

Используя разработанную методику анализа газообразного топлива и продуктов его горения, можно автоматизировать процесс газохроматографического разделения, что позволит уменьшить погрешность определения анализируемых компонентов и оптимизировать технологические процессы. Это представляет несомненную теоретическую ценность, а кроме того, расширяет возможности практического применения методов газовой хроматографии.

Цель исследования и разработки состоит в совершенствовании газохроматографических методов анализа газообразного топлива и продуктов его горения, направленных на оптимизацию технологических процессов для улучшения экологического состояния природной среды в зоне влияния промышленных предприятий.

Научная новизна:

- разработан метод анализа газообразного топлива и продуктов его горения, основанный на сочетании газохроматографических и линейно-колористических методов;

- показана возможность определения состава газообразного топлива и продуктов его горения с использованием усовершенствованной пневматической схемы газового хроматографа, оснащенного термодесорбером;

- предложен новый метод оценки результатов газохроматографического анализа на основе трехмерной модели и создана карта индивидуального химического состава продуктов горения;

- установлена линейная зависимость постоянного расхода газа от коэффициента избытка воздуха и скорости выхода газовой смеси из газового тракта газогорелочного устройства;

- на основе разработанного метода анализа и найденных закономерностей процесса горения, предложен алгоритм, позволяющий, уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу и обеспечить высокий коэффициент полезного действия энергетических установок;

- найдены рабочие условия анализа газообразного топлива и продуктов его горения, на основе которых создана система автоматизации технологических процессов с использованием компьютерно-хроматографического модуля.

Практическая значимость работы. Созданные программные обеспечения «РУГ» и «Альфа» для оптимизации процесса газохроматографического разделения газообразных веществ позволяют проводить регулярный аналитический контроль содержания вредных примесей в атмосферном воздухе, что может быть использовано в аналитических лабораториях промышленных предприятий. Методика определения качественного и количественного состава примесей, загрязняющих атмосферный воздух в зоне влияния предприятий, была внедрена на «Казанском домостроительном комбинате».

Основные положения, выносимые на защиту:

- схема экспериментальной установки, включающая компьютерно-хроматографический модуль, систему пробоотбора, пробоподготовки, контроля и регистрации анализируемых компонентов;

- усовершенствованная пневматическая схема газового хроматографа, содержащая многоходовой кран для изменения потока газа-носителя, подаваемого на термодесорбер;

- результаты определения оптимальных параметров хроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения;
- оценка концентраций индивидуальных компонентов газообразного топлива в зависимости от технологических параметров топливосжигающей установки;
- метод определения индивидуального состава газообразного топлива и продуктов его горения, включающие газохроматографические и линейно-колористические методы анализа;
- новый метод оценки результатов газохроматографического анализа на основе трехмерной модели и созданной карты индивидуального химического состава продуктов горения;
- результаты разработки компьютерных программ «РУГ» и «Альфа» для анализа индивидуальных компонентов газообразного топлива и продуктов его горения;
- система автоматизации технологических процессов с использованием компьютерно-хроматографического модуля, позволяющая оптимизировать процесс горения.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на 54-, 55- и 56-Республиканской научной конференции (Казань, 2002, 2003 и 2004), VI-ой Международной научно-практической конференции "Кибернетика и высокие технологии XXI века" (Воронеж, 2005), XVII-ой Международной Интернет конференции молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (Москва, 2005), Аспирантско-магисторском научном семинаре (Казань, 2005), VI-ом Международном симпозиуме "Ресурсоэффективность и энергосбережение" (Казань, 2005), V-ой Всероссийской научно-практической конференции "Окружающая природная среда и экологическое образование и воспитание" (Пенза, 2005), VI-ой Международной научно-практической конференции "Проблема энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексе" (Пенза, 2005), II-ой Всероссийской научно-практической конференции "Технологическое обеспечение качества машин и приборов" (Пенза, 2005), III-ей Международной научно-практической конференции "Материалы и технологии XXI века" (Пенза, 2005), 57-Республиканской научной конференции по проблемам архитектуры и строительства посвященной 75-летию КГАСА (Казань, 2005), I-ой молодежной конференции "Тинчуринские чтения" (Казань, 2006), XVII-ой и XVIII-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (Казань, 2005 и 2006).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 19 публикациях: одна статья в рецензируемом журнале, две статьи в научных сборниках, 10 тезисов докладов, четыре патента, извещение о государственной регистрации и свидетельство об отраслевой разработке компьютерной программы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, двух глав результатов и их обсуждения, выводов и списка литературы, включающем 162 ссылки, и приложения. Работа выполнена на 152 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков (из них 16 в приложении), 18 таблиц.

В первой главе представлен обзор литературы по современному состоянию методов газохроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения, способах отбора и концентрирования проб, представлены сведения об основных видах токсичных веществ образующихся при сжигании газообразного топлива и их воздействие на природную среду.

Во второй главе приводится постановка задачи, содержится описание газохроматографической аппаратуры и системы отбора проб, условия проведения анализа исследуемого объекта и методов обработки экспериментальных данных.

Третья глава посвящена обсуждению результатов полученных при совершенствовании метода газохроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения. Приводятся рабочие условия газохроматографического разделения. Усовершенствована схема хроматографа для анализа газообразного топлива и продуктов его горения, которая позволяет проводить анализ примесных соединений с термодесорбером на двух хроматографических колонках с разными сорбентами без прерывания потока газ-носителя. Обсуждаются результаты анализа пропан-бутановой смеси, природного, газа и продуктов их горения с представлением результатов на трехмерной модели.

В четвертой главе анализируются полученные данные газохроматографического анализа продуктов горения газообразного топлива и приводится зависимость величины химического недожога от коэффициента избытка (расхода) первичного воздуха. На основе разработанного метода и полученных результатов предложена схема автоматизации газохроматографического анализа с последующей оптимизацией технологического процесса реализующегося по алгоритму работы компьютерной программы «Альфа».

Экспериментальная часть

Для совершенствования методов анализа газообразного топлива и продуктов его горения нами была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка с применением компьютерного газохроматографического комплекса «Кристаллюкс-4000М» с детектором по теплопроводности (ОАО «Биомашприбор», г. Йошкар-Ола), приведенная на рис. 1.

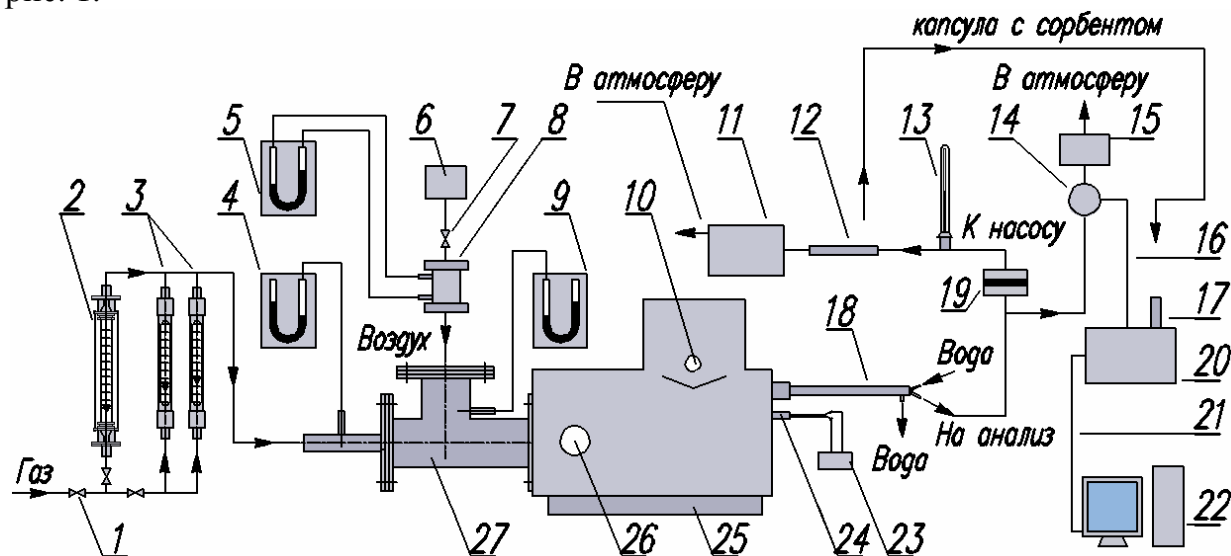


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 – вентиль регулирования расхода газа; 2 – ротаметр РМ-41УЗ (на обводной газовой магистрали); 3 – ротаметр РМ-0,25 ГУЗ; 4, 5, 9 – «U»-образные манометры; 6 – нагнетатель расхода воздуха (системный ресивер); 7 – вентиль регулирования расхода воздуха; 8 – диафрагма; 10 – ручка шиберной заслонки; 11 – аспиратор; 12 – капсула с сорбентом или индикаторная трубка; 13 – термометр; 14 – кран-дозатор; 15 – насос; 16 – газовая магистраль от крана-дозатора к хроматографу; 17 – термодесорбер; 18 – водоохлаждаемое пробоотборное устройство; 19 – сборник конденсата; 20 – хроматограф; 21 – электрическая связь хроматографа с компьютерным блоком управления; 22 – персональный компьютер; 23 – потенциометр; 24 – термopapa; 25 – экспериментальная печь; 26 – запальное отверстие; 27 – газогорелочное устройство

Проведение экспериментов, направленных на совершенствование методов анализа газообразного топлива и продуктов его горения, условно можно разделить на несколько последовательных этапов. В качестве примера на третьем этапе проведена оптимизация процесса горения газообразного топлива. Алгоритм проведения экспериментов показан на рис. 2.

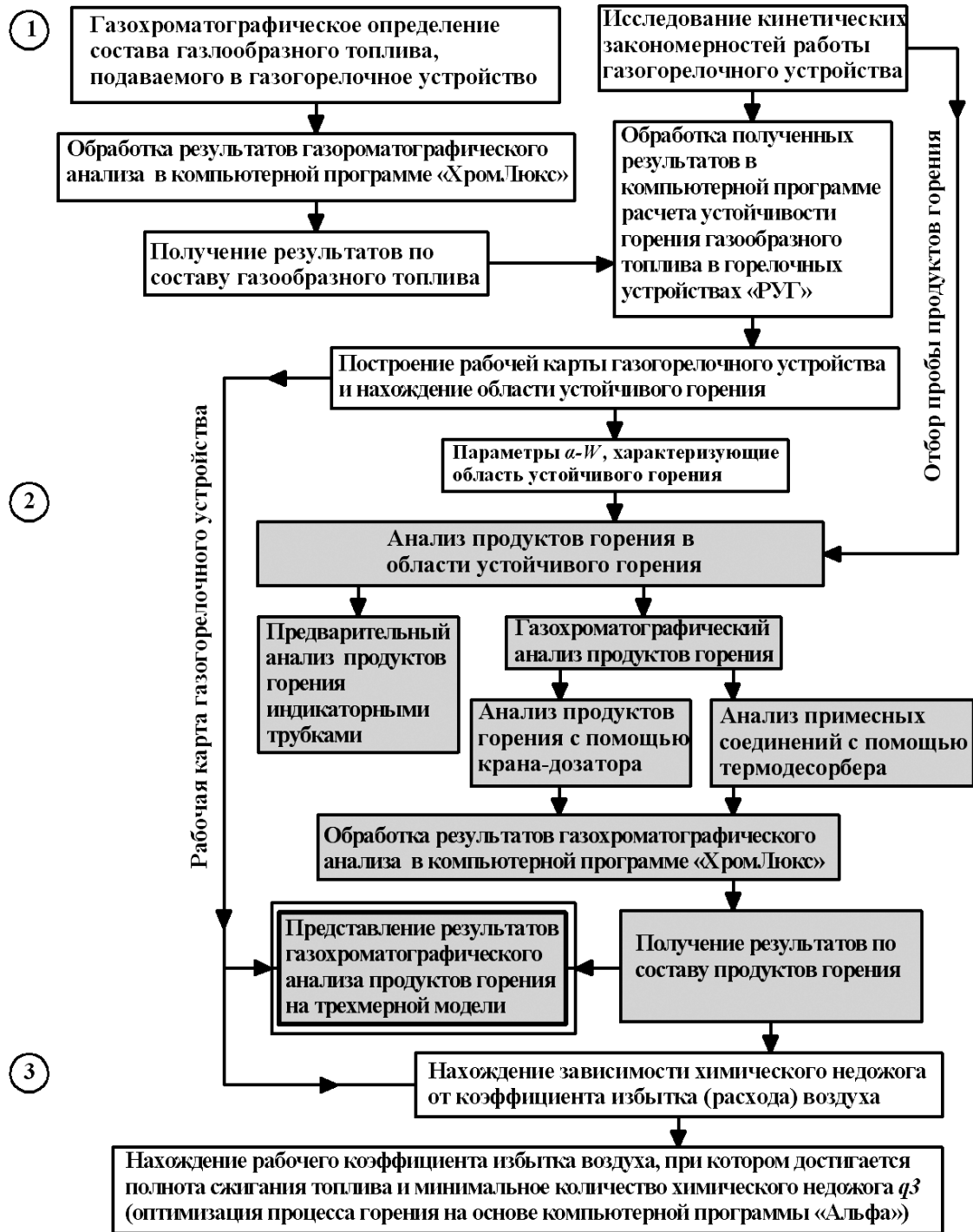


Рис. 2. Алгоритм проведения экспериментов

Сложный характер рассматриваемого объекта служит причиной необходимости первоначального рассмотрения вопросов связанных с определением области устойчивого горения. Поэтому *на первом этапе* эксперимента проводили исследование кинетических закономерностей работы газогорелочного устройства, с целью построения рабочей карты в координатах $\alpha-W$ и нахождения на ней области устойчивого горения, в которой не происходил отрыв и проскок фронта пламени.

В экспериментальной печи сжигалась смесь пропана-бутана с воздухом в различных соотношениях. Путем изменения расхода воздуха и газа были найдены значения коэффициента избытка (расхода) первичного воздуха и скорость газоздушнoй смеси, при которых происходил проскок или отрыв фронта пламени (граница области устойчивого горения). Процентное соотношение компонентов газообразного топлива, необходимое для построения рабочей карты газогорелочного устройства, определяли хроматографическим методом. Обработку полученных результатов по устойчивости горения проводили с помощью разработанной нами компьютерной программы «РУГ». Она позволила составить рабочую карту газогорелочного устройства и определить область для проведения анализа продуктов горения газообразного топлива.

На втором этапе проводили анализ продуктов горения в области устойчивого сжигания газообразного топлива. Отбор пробы проводили с помощью водоохлаждаемого пробоотборного устройства. Предварительно, с целью выявления приоритетных компонентов в продуктах горения, был проведен анализ линейно-колористическим методом с использованием индикаторных трубок. Прокачивание определенного объема пробы осуществляли электрическим аспиратором ПУ-4Э со скоростью $100 \pm 5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Отбор проб проводили при установившихся технологических режимах работы топливосжигающей установки ($\alpha = 0,81; 1,03; 1,42$). В работе применяли индикаторные трубки моделей ТИ-[ИК-К] и ГХ-Е-[ИК-К] для определения следующих компонентов: кислород, озон, оксид углерода, диоксид углерода, оксид азота, диоксид азота, диоксид серы, формальдегид, диметиламин, диэтиламин, ацетилен, изо-пентан, бензол, фенол, стирол, аммиак.

Газохроматографический анализ продуктов горения проводили в области устойчивого горения, при постоянном расходе газообразного топлива (луч РГ 2, рис. 5) и изменении расхода воздуха. Ввод пробы в газовый хроматограф осуществляли краном-дозатором с дозирочной петлей объемом $0,5 \pm 0,0025 \text{ мл}$.

Для проведения газохроматографических анализов использовали две насадочные колонки. Первая металлическая колонка длиной 2 м и внутреннем диаметром 4 мм, была заполнена цеолитом СаА 5А с зернением 0,2-0,4 мм. Вторая фторопластовая колонка длиной 1,8 метра и внутреннем диаметром 4 мм была заполнена полисорбом-1 с фракцией 0,1-0,25 мм. Работа детектора по теплопроводности осуществлялась на газе-носителе – гелий.

Обезвоживание колонки заполненной цеолитом СаА 5А проводили при температуре термостата $300 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов в потоке гелия с расходом $20 \pm 0,5 \text{ мл/мин}$. Колонку, заполненную полисорбом-1, активировали путем нагревания до температуры $250 \pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ в потоке гелия с расходом $20 \pm 0,5 \text{ мл/мин}$ в течение 2 часов.

Для анализа соединений с концентрациями меньше порогового значения определения детектора по теплопроводности использовали термодесорбер. Концентрирование в капсуле термодесорбера, с объемом сорбента $0,6 \text{ см}^3$,

проводили в течение 5 мин со скоростью прокачивания пробы 1 л/мин. Извлечение пробы из капсулы с сорбентом и ввод ее в хроматографическую колонку осуществляли путем нагрева капсулы до фиксированной температуры, со скоростью 300 °С/сек. Температуру термодесорбции для полисорба-1 устанавливали $240 \pm 0,2$ °С, а для молекулярных сит $290 \pm 0,2$ °С.

Обработку результатов газохроматографического анализа проводили с использованием компьютерной программы «ХромЛюкс».

На третьем этапе по данным газохроматографического анализа продуктов горения была рассчитана зависимость потери тепла из-за химического недожога от коэффициента избытка (расхода) первичного воздуха. Из этой зависимости (по значению минимальной величины химического недожога) был определен рабочий коэффициент избытка воздуха, при котором достигается полнота сжигания газообразного топлива.

1. Совершенствование газовой схемы хроматографа для анализа газообразного топлива и продуктов его горения

В ряде случаев чувствительность детектора ДТП для исследований состава газообразного топлива и продуктов его горения может оказаться не удовлетворительной.

Так, для анализа продуктов горения и последующего определения величины химического недожога q_3 с минимальным значением 0,1 % необходимо значение предела обнаружения по H_2 , CO , CH_4 на уровне 0,006 – 0,015 % об. Однако при этом погрешность измерения q_3 будет соизмерима с самой величиной потерь тепла от химического недожога. Поэтому, чтобы снизить погрешность в определении q_3 до 0,01 %, следует иметь порог чувствительности по анализируемым компонентам в пределах $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ % об.

Пороговая чувствительность детектора по теплопроводности используемого в работе составляет 10^{-3} % об., что может быть недостаточным для анализа некоторых компонентов продуктов горения с требуемой величиной погрешности. Для определения веществ с концентрациями меньше пороговой чувствительности детектора по теплопроводности нами был применен термодесорбер, который предназначен для ввода газообразных проб в хроматографическую колонку путем термодесорбции летучих компонентов, накопленных в капсуле с сорбентом, через которую заранее прокачивался исследуемый газ.

Было установлено, что при подготовке термодесорбера к вводу очередной пробы в хроматографическую колонку происходит прерывания потока газа-носителя. Это приводит к выходу детектирующей системы из строя в результате перегрева ее чувствительных элементов. Для исключения прерывания потока газа-носителя газовая схема хроматографа была усовершенствована путем введения дополнительной газовой магистрали и двухходового крана. По такой схеме, осуществляется работа хроматографа без прерывания газового потока с одним термодесорбером на одной колонке.

Для разработки методики газохроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения на двух колонках и с возможностью использования термодесорбиров без прерывания потока газа-носителя, схема хроматографа с двухходовым краном была усовершенствована за счет добавления дополнительных газовых магистралей и шестиходового крана (рис. 3).

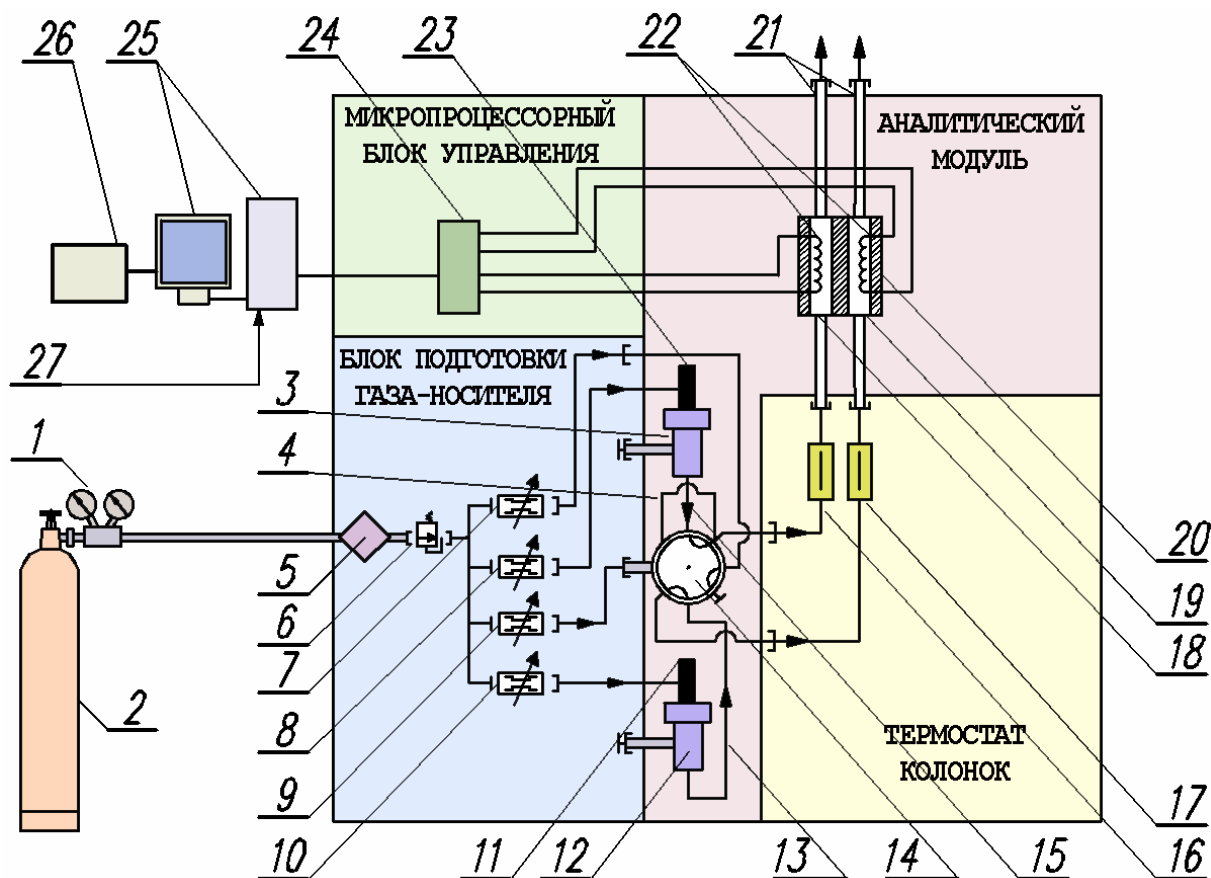


Рис. 3. Усовершенствованная схема хроматографа «Кристаллюкс-4000М» для анализа продуктов горения

1 – газовый редуктор; 2 – баллон с газом-носителем; 3, 12 – испаритель; 4 – перемычка; 5 – газовый фильтр; 6 – регулятор давления; 7, 8, 9, 10 – регуляторы расхода газа-носителя; 11, 23 – термодесорбер; 13, 15 – канал соединяющий испаритель и шестиходовой кран; 14 – шестиходовой кран; 16, 17 – хроматографическая колонка; 18 – измерительная камера детектора; 19 – сравнительная камера детектора; 20 – детектор по теплопроводности; 21 – выход газа в атмосферу; 22 – нити детектора; 24 – усилитель сигнала детектора; 25 – персональный компьютер; 26 – принтер; 27 – компьютерная программа сбора, хранения и обработки хроматографической информации «ХромЛюкс»

Предложенная схема позволяет проводить работу одновременно на двух термодесорберах и автоматизировать процесс хроматографического разделения.

2. Методика анализа газообразного топлива и продуктов его горения

На основе проведенных исследований разработан метод определения индивидуального состава газообразного топлива и продуктов его горения. Он заключается в сочетании использования линейно-колористического и газохроматографического метода анализа.

Условия газохроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения при использовании крана-дозатора следующие: первая хроматографическая колонка (2 м × 4 мм) заполняется цеолитом СаА (5А) с фр. 0,2-0,4 мм, вторая (1,8 м × 4 мм) – полисорб-1 с фр. 0,1-0,25 мм. На цеолите СаА происходит разделение метана, оксида углерода, кислорода и азота, которое не достижимо на сорбенте полисорб-1. На полимерном сорбенте полисорб-1 происходит разделение водяных паров и диоксида углерода, которые необратимо адсорбируются при использовании цеолита СаА. Скорость газ-носителя (гелий) – 30 мл/мин, ток моста ДТП – 60 мА. Программирование температуры термостата хроматографических колонок от 100 до 160 °С. Объем дозирочной петли крана-дозатора – 0,5 мл.

Условия анализа примесных соединений с помощью термодесорбера: капсула (53 × 4 мм) заполняется сорбентом объемом 0,6 см³. Цеолит СаА (5А) используется для концентрирования примесей с эффективным размером молекул вплоть до пропана и полисорб-1 – для более тяжелых примесей. Концентрирование примесей в капсуле с сорбентом осуществляется путем прокачивания через нее объема пробы, со скоростью 1 л/мин в течение 5 мин при $t = 20$ °С. Капсула с сорбентом нагревается в термодесорбере со скоростью 300 °С/сек до фиксированной температуры которая для полисорба-1 составляет 240 °С, а для молекулярных сит 290 °С.

Правильность метода проверена способом «введено-найдено» на примере определения метана. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты газохроматографического определения метана

($n=5$; $P=0,95$; $t_{\text{табл}}=2,78$)

Определяемый компонент	введено, мг/л	найдено, мг/л	Sr, %	$t_{\text{расч}}$
метан	429	430±4	0,77	1,03
	571	578±7	0,98	2,75
	714	715±1	0,12	2,41

Систематическая погрешность незначительна, так как: $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$.

3. Анализ газообразного топлива

Метод определения индивидуального состава газообразного топлива и продуктов его горения на основе усовершенствованного компьютерно-хроматографического модуля был использован для анализа пропан-бутановой смеси.

Хроматограмма анализа пропан-бутановой смеси представлена на рис. 4, а результаты определения сведены в табл. 2.

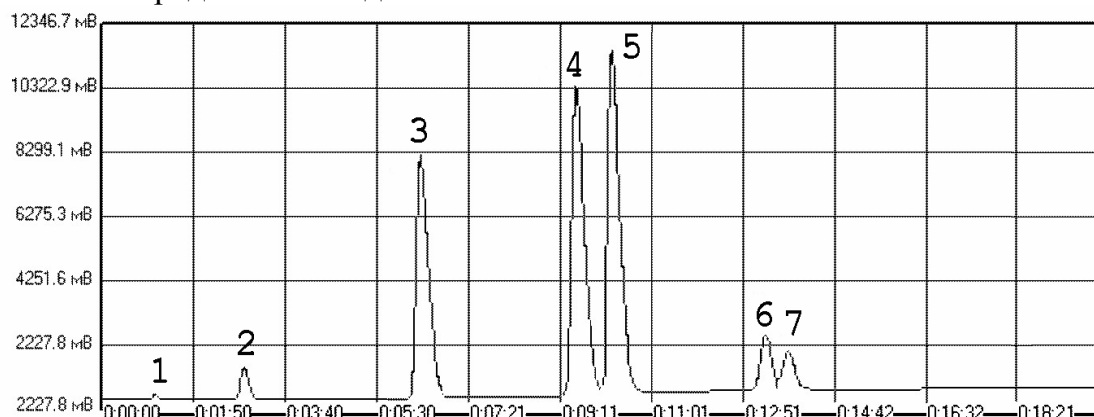


Рис. 4. Хроматограмма пропан-бутановой смеси, полученная на колонке (2 м × 4 мм) заполненной цеолитом CaA (5A), при температуре термостата 100 °С, газ-носитель гелий со скоростью 30 мл/мин; ток моста ДТП – 60мА: 1 – метан; 2 – этан; 3 – пропан; 4 – изо-бутан; 5 – н-бутан; 6 – изо-пентан; 7 – н-пентан

Таблица 2. Результаты определения состава пропан-бутановой смеси (n=5, P=0,95)

№	название компонента	формула	t_R , мин	концентрация, % об.	
				$X \pm \Delta X$	S_r , %
1	метан	CH_4	1,12	$0,19 \pm 0,01$	4,17
2	этан	C_2H_6	2,92	$1,52 \pm 0,05$	2,80
3	пропан	C_3H_8	6,33	$22,8 \pm 0,3$	0,99
4	изо-бутан	C_4H_{10}	9,53	$29,4 \pm 0,3$	0,81
5	н-бутан	C_4H_{10}	10,25	$37,8 \pm 0,2$	0,40
6	изо-пентан	C_5H_{12}	13,38	$4,5 \pm 0,1$	2,17
7	н-пентан	C_5H_{12}	13,83	$3,23 \pm 0,09$	2,14

Результаты определения состава пропан-бутановой смеси послужили основой для создания рабочей карты газогорелочного устройства и нахождения области устойчивого горения, в которой проводился анализ продуктов горения.

Кроме того, полученные результаты были внесены в базу данных разработанной нами компьютерной программы «Альфа», которая предназначена для осуществления автоматизации анализа индивидуальных компонентов газообразного топлива и продуктов его горения, позволяющая оптимизировать процесс горения.

4. Анализ продуктов горения газообразного топлива

Согласно разработанного нами метода хроматографический анализ продуктов горения газообразного топлива проводили после исследования рабочих характеристик газогорелочного устройства и нахождения области устойчивого горения.

4.1. Определение области устойчивого горения

Обработка данных эксперимента по определению области устойчивого горения проводилась при помощи созданной нами компьютерной программы «РУГ» по следующим формулам:

Скорость выхода газозвдушной смеси из газового тракта горелки находится по формуле:

$$W = \frac{(V_{\Gamma.} + V_{B.})}{F}, \quad (1)$$

где $V_{\Gamma.}$ – объем газа поступающего в горелочное устройство, м³/с; $V_{B.}$ – объем воздуха поступающего в газогорелочное устройство, м³/с; F – суммарная площадь газового кратера и кольцевой щели (пилотного стабилизатора) газогорелочного устройства, м².

Коэффициент избытка (расхода) первичного воздуха находится по формуле:

$$\alpha = \frac{V_{Д.}}{V_{T.}} = \frac{V_{B.}}{V_{T.} \times V_{\Gamma.}}, \quad (2)$$

где $V_{Д.}$ – действительный расход воздуха, м³/м³; $V_{T.}$ – теоретически необходимый расход воздуха на сжигание 1 м³ газа, м³/м³; $V_{B.}$ – объем воздуха поступающего в газогорелочное устройство, м³/с; $V_{\Gamma.}$ – объем газа поступающего в горелочное устройство, м³/с.

В компьютерной программе «РУГ» реализованы установленные нами закономерности процесса горения газообразного топлива. При совместном решении (1) и (2), постоянный расход газа в координатах $\alpha - W$ подчиняется линейной зависимости.

$$W = \frac{V_{\Gamma.} \times (1 + \alpha \times V_{T.})}{F}, \quad (3)$$

точка схода лучей постоянного расхода газа (РГ) определяется по формуле (3) при $W = 0$.

$$\alpha^I = -\frac{1}{V_{T.}}. \quad (4)$$

Точку схода лучей постоянного расхода газа в зависимости от химического состава газообразного топлива можно найти по следующей формуле:

$$\alpha^I = -\frac{1}{\frac{4,76}{100} \times \left(0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right)} \times \frac{1}{(1 + 0,00124d_H)}, \quad (5)$$

где d_H – влагосодержание сухого воздуха, г/м³ ($d_H = 10$ г/м³); CO, H₂, H₂S, C_mH_n – горючие компоненты газообразного топлива, об. %; 4,76 – значение, учитывающее содержание кислорода в атмосферном воздухе.

Процесс сжигания газообразного топлива, в соответствии с установленными закономерностями, может протекать по двум схемам: при постоянном расходе воздуха и изменении расхода газа и при постоянном расходе газа и изменении расхода воздуха (рис. 5).

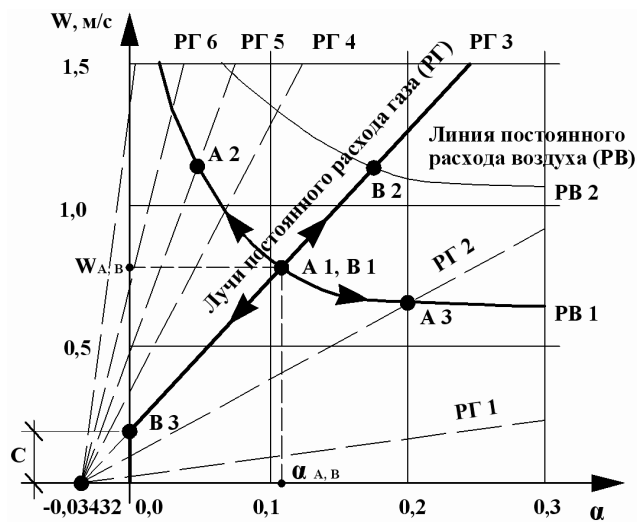


Рис. 5. Процесс сжигания газообразного топлива в координатах α - W

Процесс сжигания газообразного топлива в первом случае, как это видно на рис. 5, проходит по линии постоянного расхода воздуха (РВ 1), причем точка А 1, находящаяся на пересечении луча постоянного расхода газа (РГ 3) и линии (РВ 1), дает координатные значения величин скорости газовоздушной смеси W_A и коэффициента избытка (расхода) воздуха α_A . При увеличении расхода газа от значения соответствующего лучу РГ 3 до РГ 5, точка А 1 будет менять свои координаты по линии

РВ 1 до значения точки А 2. При уменьшении расхода газа от значения соответствующего лучу РГ 3 до РГ 2, точка А 1 будет менять свои координаты по линии РВ 1 до значения точки А 3.

При сжигании газообразного топлива с постоянным расходом газа и изменением расхода воздуха процесс проходит по линии постоянного расхода газа (РГ 3), причем точка В 1, находящаяся на пересечении линии постоянного расхода воздуха (РВ 1) и луча (РГ 3), дает значения координат скорости газовоздушной смеси W_B и коэффициента избытка (расхода) воздуха α_B . При увеличении расхода воздуха от значения соответствующего линии РВ 1 до РВ 2, точка В 1 будет менять свои координаты по линии РГ 3 до значения точки В 2. При уменьшении расхода воздуха от значения соответствующего линии РВ 1 до расхода воздуха равному нулю, точка В 1 будет менять свои координаты по линии РГ 3 до значения точки В 3, а затем процесс будет направлен вертикально вниз до точки с координатами $W = 0$; $\alpha = 0$. Величина C показывает скорость выхода газовой смеси, при отсутствии подачи первичного воздуха в газогорелочное устройство.

Разработанная нами компьютерная программа «РУГ», позволила составить рабочую карту газогорелочного устройства и определить область устойчивого горения, а найденные новые закономерности процесса горения газообразного топлива, позволили в дальнейшем представить результаты газохроматографического анализа на трехмерной модели.

4.2. Анализ продуктов горения с использованием индикаторных трубок

Предварительно концентрацию приоритетных компонентов продуктов горения (в области устойчивого горения) определяли с помощью индикаторных трубок. Такой метод предполагает погрешности определения до 50 % и выше. Результаты определения состава продуктов горения газообразного топлива, при $\alpha=0,81$ и постоянном расходе газа РГ 2,8; $\alpha=1,03$ и РГ 2,6; $\alpha=1,42$ и РГ 1,6, приведены в табл. 3. Также в этой таблице приводятся значения ПДК_{м.р.} в соответствии с ГН 2.1.6.1338-03. Эти данные применимы только для ориентировочной оценки результатов анализа продуктов горения, так как отбор проб производился непосредственно на выходе из газосжигающей установки.

Таблица 3. Результаты определения состава продуктов горения газообразного топлива с использованием индикаторных трубок (n=3)

Индикаторная трубка	Анализируемое соединение								
	O ₂	NO ₂	NO	SO ₂	CO ₂	CO	C ₆ H ₆	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₅ OH
Объем прокачиваемой пробы, см ³	100	800	800	1000	500	800	800	1000	800
Найденные концентрации, мг/м ³ ($\alpha=0,81$) $X \pm \Delta X$	–	1,8±0,5	39±11	2,3±0,6	79766±20597	49675±12419	114±30	569±142	179±45
Найденные концентрации, мг/м ³ ($\alpha=1,03$) $X \pm \Delta X$	19965±4991	38±11	50±15	5±1	175699±47125	14004±3501	33±11	61±15	95±24
Найденные концентрации, мг/м ³ ($\alpha=1,42$) $X \pm \Delta X$	83853±20963	42±15	62±22	25±6	51246±17387	16338±4084	25±8	180±45	170±42
Норма ПДК _{м.р.} в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	–	0,085	0,4	0,5	–	5	0,3	100	0,01

В процессе анализа продуктов горения газообразного топлива индикаторными трубками при различных режимах работы газосжигающей установки не были обнаружены: аммиак; диметиламин; диэтиламин; озон; формальдегид, стирол.

Предполагалось (согласно литературным данным), что оптимизация процесса горения будет достигаться при коэффициенте избытка воздуха $\alpha \approx 1$. Однако как это видно из табл. 3 при $\alpha = 1,03$ наблюдаются повышенные концентрации оксидов азота, оксида углерода и др. соединений, что свидетельствует о не достаточно полном сжигании газообразного топлива.

Оптимальный режим работы газосжигающей установки (рабочий коэффициент избытка воздуха) в дальнейшем был найден по результатам газохроматографического анализа продуктов горения.

4.3. Газохроматографический анализ продуктов горения

Анализ продуктов горения проводили (в области устойчивого горения) с использованием двух насадочных колонок и ввода проб краном-дозатором. Полученные хроматограммы продуктов горения приведены на рис. 6.

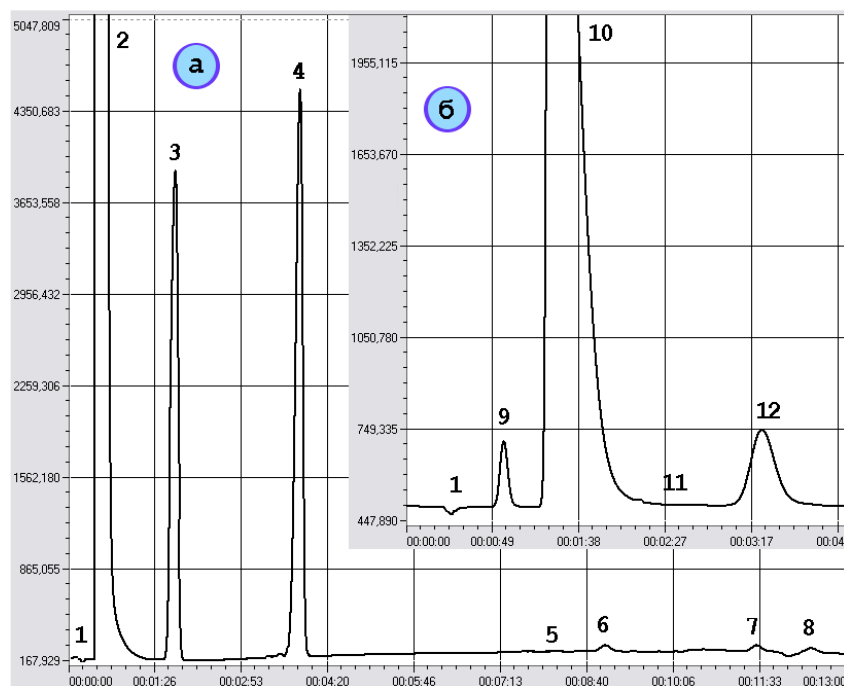


Рис. 6. Фрагменты хроматограмм продуктов горения пропан-бутановой смеси ($\alpha = 1$), программирование температуры термостата от 100 до 160 °С, газ-носитель гелий со скоростью 30 мл/мин, ток моста ДТП – 60 мА, колонка заполнена: а) полисорбom-1; б) цеолитом CaA (5A). 1 – водород; 2 – воздух; 3 – диоксид углерода; 4 – вода; 5 – пропилен; 6 – пропан; 7 – изо-бутан; 8 – н-бутан; 9 – кислород; 10 – азот; 11 – метан; 12 – оксид углерода

Использование термодесорбера и усовершенствованной схемы хроматографа, позволило уменьшить ПрО, как это показано на рис. 7, где приведено сравнение хроматограмм продуктов горения с использованием крана-дозатора и термодесорбера. Так, для бензола значение ПрО составили $1,87 \cdot 10^{-5}$ и $1,92 \cdot 10^{-6}$ мг/мл, соответственно.

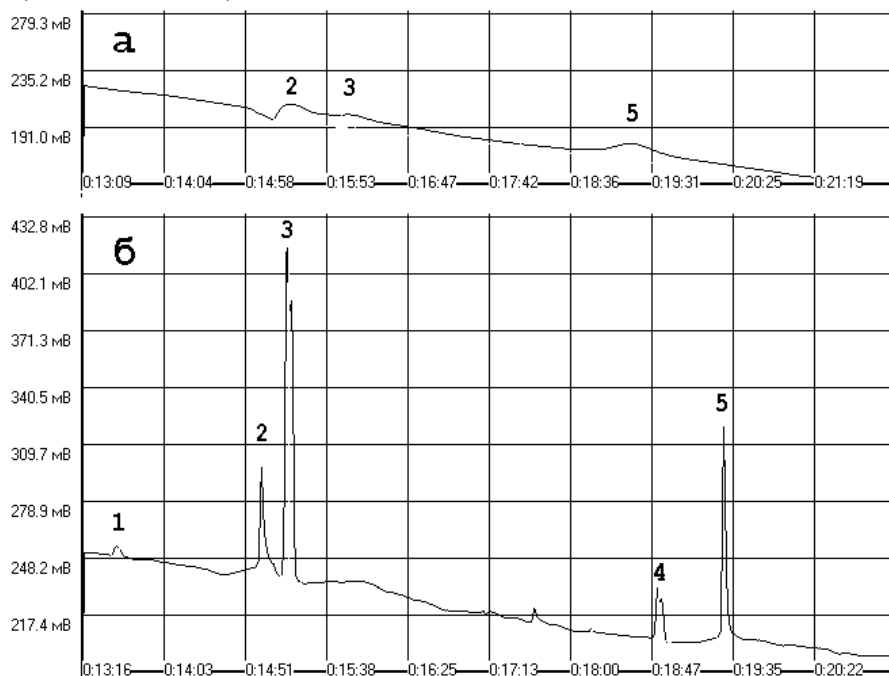


Рис. 7. Фрагменты хроматограмм продуктов горения пропан-бутановой смеси ($\alpha = 1$), колонка заполнена полисорбom-1; ввод пробы: а) краном-дозатором с петлей 0,5 мл; б) термодесорбером с капсулой заполненной полисорбom-1. 1 – пентен; 2 – изо-пентан; 3 – н-пентан; 4 – гексан; 5 – бензол

Результаты анализа по основным компонентам продуктов горения, найденные хроматографическим методом, сведены в табл. 4.

Таблица 4. Содержание (% об.) некоторых компонентов в продуктах горения пропан-бутановой смеси в зависимости от коэффициента избытка воздуха

Компоненты	Коэффициент избытка (расхода) воздуха										
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Оксид углерода CO	14,92	11,80	9,11	6,54	4,30	2,56	1,10	0,10	—	—	—
Диоксид углерода CO ₂	1,90	2,80	3,90	5,10	4,59	8,06	9,47	8,70	7,75	7,10	6,59
Водород H ₂	24,22	16,88	11,39	7,32	4,46	1,78	0,09	1,2·10 ⁻³	—	—	—
Водяные пары H ₂ O	8,19	12,40	15,40	17,33	18,13	18,30	17,90	17,14	16,19	14,87	14,04
Азот N ₂	50,78	56,11	60,21	63,70	68,51	69,29	70,89	72,26	73,02	73,52	73,50
Кислород O ₂	—	—	—	—	—	—	0,53	1,79	3,02	4,50	5,85
Оксиды азота NO _x	—	—	—	—	4,6·10 ⁻³	5,3·10 ⁻³	5,8·10 ⁻³	7,3·10 ⁻³	8,6·10 ⁻³	8,3·10 ⁻³	7,5·10 ⁻³
Пропилен C ₃ H ₆	—	—	—	1,8·10 ⁻³	1,1·10 ⁻³	0,4·10 ⁻³	—	—	—	—	—
Этилен C ₂ H ₄	—	—	—	3,9·10 ⁻³	2,2·10 ⁻³	0,9·10 ⁻³	0,2·10 ⁻³	0,1·10 ⁻³	—	—	—
Ацетилен C ₂ H ₂	—	—	—	—	7,8·10 ⁻³	1,1·10 ⁻³	1,9·10 ⁻³	—	—	—	—

Установленные закономерности процесса горения газообразного топлива позволили представить результаты газохроматографического анализа на трехмерной модели (рис. 8).

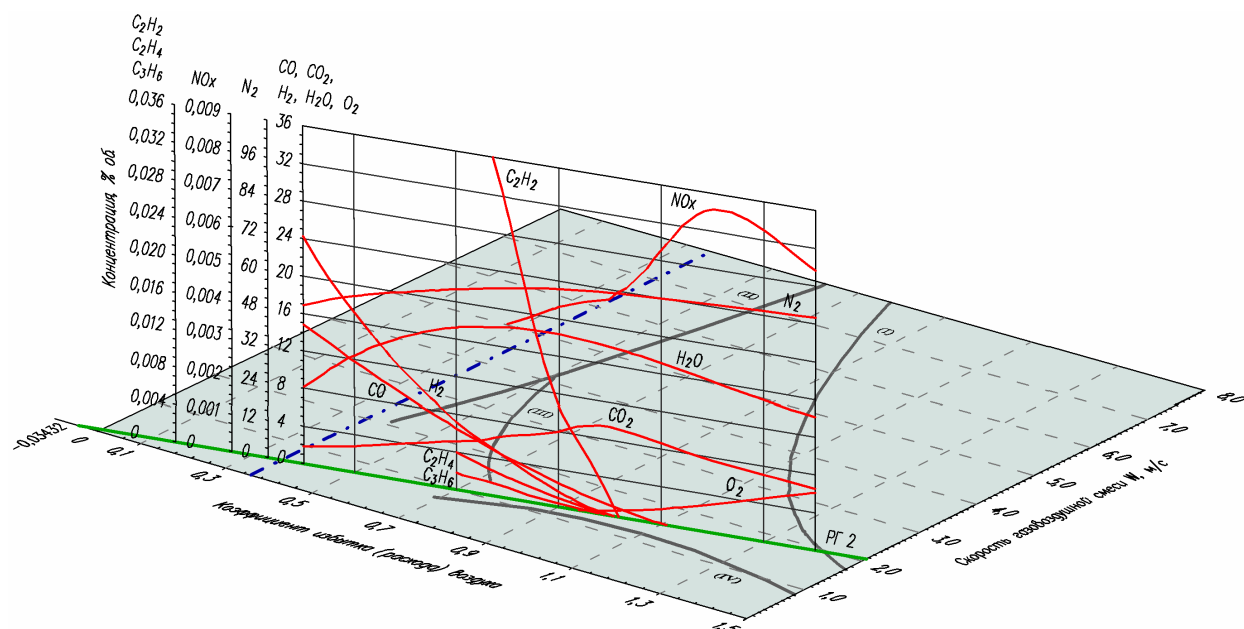


Рис. 8. Состав продуктов горения пропан-бутановой смеси в зависимости от коэффициента избытка воздуха α и заданного расхода газа (луч РГ 2)

I – кривая отрыва пламени; II – линия погасания пламени; III – линия появления желтых язычков пламени; IV – кривая проскока пламени; РГ – линия постоянного расхода газа

В основе этой модели (плоскость X-Y) лежит рабочая карта газогорелочного устройства. Область устойчивого горения ограничена линиями: отрыва пламени от горелочного устройства (I), погасания пламени при недостатке кислорода в зоне горения (II), линией появления желтых язычков пламени (III) и проскока пламени в горелку (IV). Концентрации компонентов, входящих в продукты горения газообразного топлива, определялись при постоянном расходе газа (РГ 2) и изменении расхода воздуха. Поэтому график химического состава продуктов горения газообразного топлива располагается в плоскости сечения луча постоянного расхода газа (РГ 2). Такая трехмерная модель позволяет проводить комплексную оценку результатов газохроматографического анализа продуктов горения для нахождения оптимальных режимов работы газосжигающей установки.

5. Автоматизация проведения газохроматографического анализа газообразного топлива и продуктов его горения на основе компьютерно-хроматографического модуля

По результатам проведенного нами хроматографического анализа продуктов горения газообразного топлива, при постоянном расходе газа (луч РГ 2), была найдена зависимость величины химического недожога от коэффициента избытка (расхода) воздуха (рис. 9).

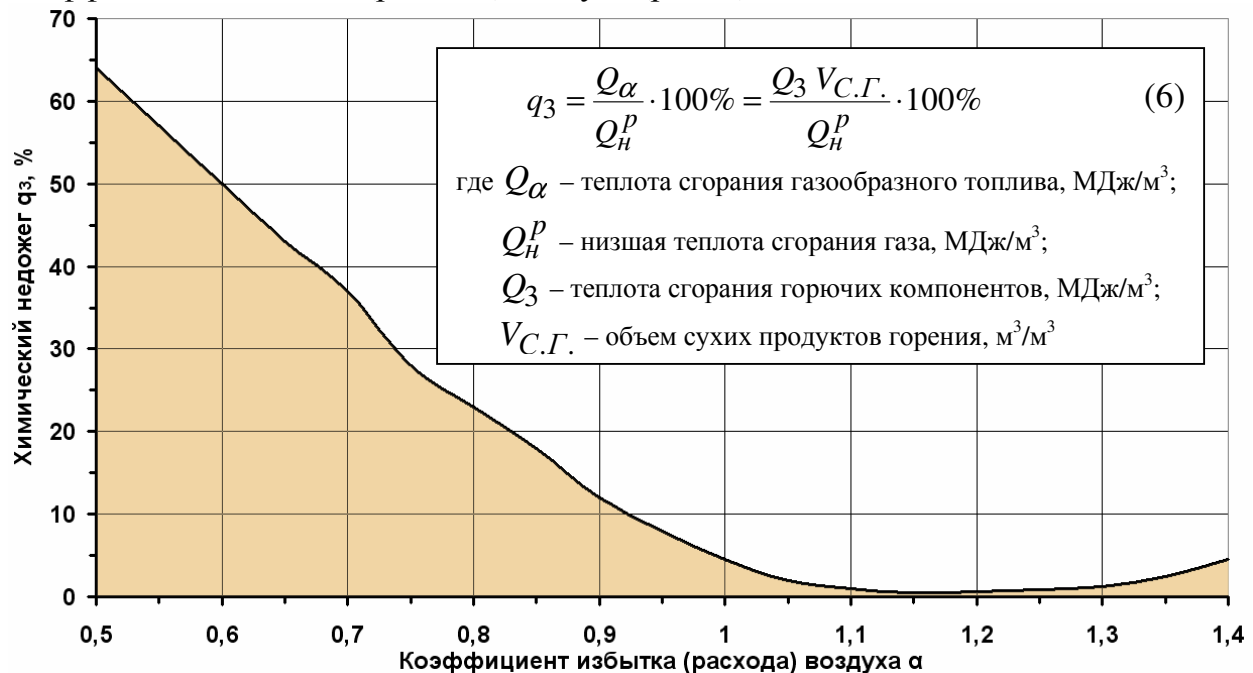


Рис. 9. Зависимость величины химического недожога от коэффициента избытка (расхода) воздуха α

Эта зависимость показывает, что используемая в работе пропан-бутановая смесь сжигается с максимальной теплоотдачей и минимальным химическим недожогом при $\alpha = 1,15$. Работа с этим коэффициентом избытка воздуха позволяет оптимизировать процесс горения, обеспечить эффективность использования

топливосжигающей установки и существенно уменьшить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

По результатам проведенных исследований нами было разработано устройство автоматизации анализа индивидуального состава газообразного топлива и продуктов его горения (рис. 10).

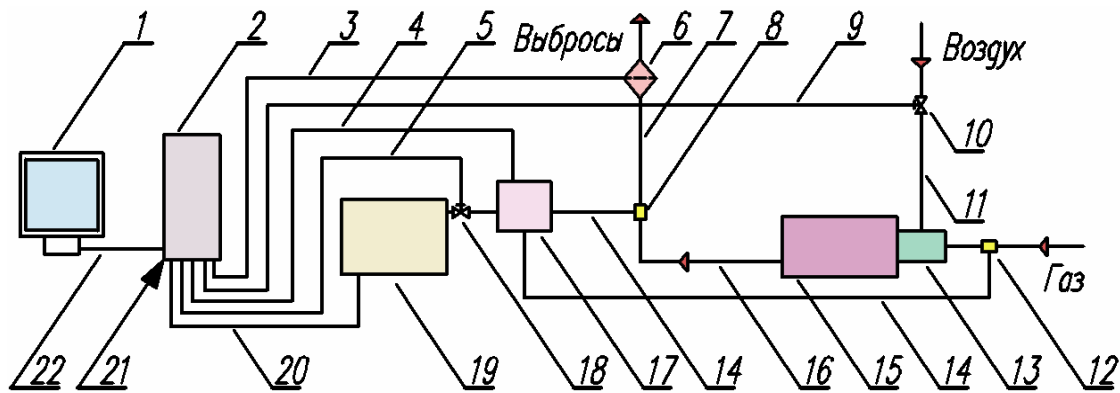


Рис. 10. Схема устройства автоматизации анализа индивидуального состава газообразного топлива и продуктов его горения

1 – монитор; 2 – блок управления; 3 – электрическая связь с фильтром; 4 – электрическая связь с термодесорбером; 5 – электрическая связь с краном-дозатором; 6 – фильтр промышленных выбросов в атмосферу; 7 – труба; 8 – датчик промышленных выбросов в атмосферу; 9 – электрическая связь с шиберной задвижкой; 10 – шиберная задвижка; 11 – линия подачи воздуха в газогорелочное устройство; 12 – датчик состава газообразного топлива; 13 – газогорелочное устройство; 14 – пневматическая связь; 15 – топливосжигающая установка; 16 – отвод продуктов горения в атмосферу; 17 – термодесорбер; 18 – автоматический кран-дозатор; 19 – газовый хроматограф; 20 – электрическая связь с хроматографом; 21 – компьютерная программа «Альфа» для осуществления автоматизации анализа индивидуальных компонентов газообразного топлива и продуктов его горения, позволяющая оптимизировать процесс горения; 22 – электрическая связь с компьютером

Разработанное устройство может осуществлять оптимизацию процесса горения. Для этого, как видно на схеме (рис. 10), проводятся два параллельных анализа: состава газообразного топлива и продуктов горения. Обработка данных, поступающих от хроматографа, в данном устройстве проводится с помощью компьютерной программы «Альфа», работа которой осуществляется по разработанному нами алгоритму. По данным хроматографического анализа состав газообразного топлива сравнивается с результатами предыдущего замера, а состав продуктов горения со значениями базы данных по ПДК. Формирование сигнала на исполнительный механизм в разработанном устройстве происходит в соответствии с базой данных, в которой записаны зависимости величин превышения ПДК и изменения состава газообразного топлива от коэффициента избытка первичного воздуха. Путем регулирования и периодического контроля

количества воздуха подаваемого в зону горения, достигается полнота сжигания газозоообразной смеси и тем самым оптимизируется процесс горения.

ВЫВОДЫ

1. Создана экспериментальная установка для определения концентраций газозоообразного топлива и продуктов его горения на основе компьютерного газохроматографического комплекса, состоящего из усовершенствованного газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М» с детектором по теплопроводности, насадочных колонок с различными селективными свойствами и термодесорбера.

2. Усовершенствованна пневматическая схема газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М», позволяющая проводить анализ газозоообразного топлива и продуктов его горения с помощью термодесорбера на двух хроматографических колонках, имеющих разные длины и сорбенты с различными селективными свойствами, для повышения эффективности разделения индивидуальных компонентов пробы.

3. Найдены рабочие условия газохроматографического разделения газозоообразного топлива и продуктов его горения заключающиеся в использовании двух хроматографических колонок с заполнением цеолитом СаА и полисорбом-1, детектором по теплопроводности с силой тока моста 60 мА, скорости газоносителя 30 мл/мин и температуры анализа с программированием от 100 до 160 °С.

4. Определены рабочие условия концентрирования примесных соединений в капсуле термодесорбера заполненной цеолитом СаА и полисорбом-1. Время концентрирования в объеме сорбента 0,6 см³, со скоростью прокачивания 1 л/мин, составило 5 мин, время термодесорбции – менее 1 сек.

5. Показано, что для предварительного анализа продуктов горения газозоообразного топлива может быть использован линейно-колористический метод с использованием индикаторных трубок.

6. Установлены закономерности процесса горения газозоообразного топлива, заключающиеся в том, что в координатах α -W постоянный расход газа подчиняется линейной зависимости. Точка схода лучей постоянного расхода газа для используемой смеси пропана-бутана находится в координатах $\alpha^1 = -0,03432$; $W = 0$. Это позволило создать компьютерную программу «РУГ» и проводить с помощью ее комплексную оценку результатов газохроматографического анализа на основе трехмерной модели.

7. Найдена зависимость содержания компонентов в продуктах горения газозоообразного топлива от коэффициента избытка (расхода) воздуха и представлена на трехмерной модели, что позволяет проводить оптимизацию процесса горения.

8. Разработана компьютерная программа анализа индивидуальных компонентов газозоообразного топлива и продуктов его горения «Альфа»,

позволяющая уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу и обеспечивающая высокий коэффициент полезного действия энергетических установок.

9. Предложена схема автоматизации технологических процессов с использованием компьютерно-хроматографического модуля и показана возможность работы топливосжигающей установки на найденном оптимальном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,15$, при работе на котором достигается полнота сжигания газообразного топлива и минимальная величина химического недожога. Методика определения качественного и количественного состава примесей, загрязняющих атмосферный воздух в зоне влияния предприятий, была внедрена на «Казанском домостроительном комбинате».

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в журнале

1. Александров Ю.Б. Методы исследования процесса горения газообразного топлива в теплоэнергетических установках [текст] / Ю.Б. Александров, А.В. Танеева, В.Ф. Новиков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2006.- № 9-10.- С.23-32.

Статьи в научных сборниках

2. Александров Ю.Б. Исследование горелочного устройства для термических печей [текст] / Ю.Б. Александров // Материалы 54, 55-й республиканской научной конференции: Сборник научных трудов студентов./ Казань: КГАСА, 2003.- С.47-51.
3. Александров Ю.Б. Исследование процесса горения газообразного топлива в нагревательных печах [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, В.Ф. Новиков // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции "Кибернетика и высокие технологии XXI века"./ Воронеж, 2005.- С.580-589.

Тезисы докладов

4. Александров Ю.Б. Оптимизация процесса горения газообразного топлива теплоэнергетических установок промышленных предприятий [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, В.Ф. Новиков // VI Международная научно-практическая конференция "Проблемы энергосбережения и экологии в промышленных и жилищно-коммунальных комплексах" (14 апр., 2005). Пенза, 2005.- Тез.докл.- С.42-44.
5. Александров Ю.Б. Горелочное устройство для термообработки отбросных газов [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, В.Ф. Новиков // XVII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (17-19 мая, 2005). Казань, 2005.- Тез.докл.- Т.2.- С.16-17.
6. Гиззатуллин А.Р. Газохроматографические и смежные методы анализа в системе экологического мониторинга промышленных предприятий [текст] / А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, Е.Г. Чикляев, Ю.Б. Александров,

- В.Ф. Новиков // V Всероссийская научно-практическая конференция "Окружающая природная среда и экологическое образование и воспитание" (17-18 февр., 2005). Пенза, 2005.- Тез.докл.- С.13-15.
7. Александров Ю.Б. Термическая обработка металла в печах безокислительного нагрева [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, В.Ф. Новиков // III Международная научно-техническая конференция "Материалы и технологии 21 века" (28 февр.-1 марта, 2005). Пенза, 2005.- Тез.докл.- С.33-35.
 8. Александров Ю.Б. Хроматографический контроль технологических свойств металлоизделий [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, В.Ф. Новиков // II Всероссийская научно-практическая конференция "Технологическое обеспечение качества машин и приборов" (10 апр., 2005). Пенза, 2005.- Тез.докл.- С.20-23.
 9. Гиззатуллин А.Р. Создание локальной сети экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных предприятий строительного комплекса [текст] / А.Р. Гиззатуллин, А.В. Федоренко, Е.Г. Чикляев, Ю.Б. Александров, В.Ф. Новиков // V Всероссийская научно-практическая конференция "Окружающая природная среда и экологическое образование и воспитание" (17-18 февр., 2005). Пенза, 2005.- Тез.докл.- С.6-8.
 10. Александров Ю.Б. Экологический мониторинг промышленных предприятий хроматографическими методами [текст] / Ю.Б. Александров, К.Ф. Халитов, А.А. Галиуллина, А.В. Танеева, В.Ф. Новиков // XVII ежегодная международная интернет-конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения, МИКМУС пробмаш (21-23 дек., 2005). Москва, 2005.- Тез.докл.- С.257.
 11. Александров Ю.Б. Хроматографический анализ в системе экологического мониторинга [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Танеева, К.Ф. Халитов, Б.В. Александров, А.А. Карташова, В.Ф. Новиков // XVIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (16-18 мая, 2006). Казань, 2006.- Тез.докл.- Т.2.- С.42-44.
 12. Александров Ю.Б. Газогорелочное устройство [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, А.В. Танеева, К.Ф. Халитов, Б.В. Александров, В.Ф. Новиков // XVIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (16-18 мая, 2006). Казань, 2006.- Тез.докл.- Т.2.- С.3-5.
 13. Матухина Е.В. О характере систематических ошибок, допущенных при округлении значений ПДК химических веществ в природной воде [текст] / Е.В. Матухина, Н.П. Кочеткова, О.А. Ермолаева, Д.А. Аглиуллина, Ю.Б. Александров, Р.Х. Тукшаитов, В.Ф. Новиков // XII ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (2-3 марта, 2006). Москва, 2006.- Тез.докл.- Т.2.- С.235-237.

Патенты

14. Патент на изобретение №2216689 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 14/62. Горелочное устройство [текст] / М.Г. Зиганшин, А.В. Белов, Ю.Б. Александров; заявитель и патентообладатель Казан. гос. архитектурно-строительная академия – № 2002120392/06; заявл. 29.07.02; опубл. 20.11.03, Бюл. № 32.– 2 с.: ил.

15. Патент на полезную модель №52484 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 30/00. Хроматограф [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, Б.В. Александров, В.Ф. Новиков; заявитель и патентообладатель Казан. гос. архитектурно-строительный ун-т. – № 2005125250/22; заявл. 08.08.05; опубл. 27.03.06, Бюл. № 9.– 1 с.: ил.

16. Патент на полезную модель №53183 Российская Федерация, МПК⁷ B 01 J 4/02. Устройство экологического мониторинга [текст] / О.Р. Каратаев, А.Р. Гиззатуллин, Е.Г. Чикляев, Р.Н. Каратаев, В.Ф. Новиков, А.В. Танеева, Е.С. Перикова, А.Д. Волоцкой, А.В. Синкевич, Б.В. Александров, Ю.Б. Александров, С.Г. Бабий, К.Ф. Халитов, Е.А. Хамзина; заявитель и патентообладатель О.Р. Каратаев – № 2006100385/22; заявл. 10.01.06; опубл. 10.05.06, Бюл. № 13.– 2 с.: ил.

17. Патент на полезную модель №56642 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 N 30/20. Хроматограф [текст] / Ю.Б. Александров, А.Р. Гиззатуллин, Б.В. Александров, А.В. Танеева, В.Ф. Новиков; заявитель и патентообладатель Казан. гос. энерг. ун-т. – № 2006105870/22; заявл. 26.02.06; опубл. 10.09.06, Бюл. № 25.– 2 с.: ил.

Государственные регистрации разработки

18. Александров Ю.Б. Свидетельство РФ об отраслевой регистрации разработки № 6767. Расчет устойчивости горения газообразного топлива в горелочных устройствах (Компьютерная программа «РУГ») [текст] / Ю.Б. Александров // Москва: Рособразование. Оpubл. 15.08.06.

19. Александров Ю.Б. Извещение о государственной регистрации в «Национальном информационном фонде неопубликованных документов» № 50200601525. Расчет устойчивости горения газообразного топлива в горелочных устройствах (Компьютерная программа «РУГ») [текст] / Ю.Б. Александров // Москва: Рособразование. Дата регистр. 23.08.06.